

基于车车通信的列车自主运行系统 降级运行方案研究

杜时勇¹ 付国平² 胡 映³

(1. 中铁二院华东勘察设计有限责任公司, 310004, 杭州; 2. 杭州地铁运营有限公司, 310011, 杭州;
3. 杭州市地铁集团有限责任公司, 310003, 杭州)

摘 要 [目的] 基于车车通信的 TACS(列车自主运行系统)作为新一代列车控制系统,与 CBTC(基于通信的列车控制)在系统架构上存在显著差异。需对 TACS 在设备故障情况下的降级运行方案进行研究,以保证列车安全、可靠运行。[方法] 阐述了基于车车通信 TACS 的特点,介绍了 TACS 的架构,并分析了 TACS 的特征。分析了 TACS 的降级运行需求,提出了基于“雷达+视觉方式”多传感器融合技术的 TACS 降级运行方案。[结果及结论] 该降级运行方案能有效解决列车的测速、定位、间隔防护问题,并能有效检测轨道区域异物入侵。

关键词 城市轨道交通; 信号系统; 列车控制; 车车通信; 列车降级运行; 多传感器融合技术

中图分类号 U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.048

Research on Degraded Operation Scheme of Train Autonomous Control System Based on Vehicle-to-vehicle Communication

DU Shiyong¹, FU Guoping², HU Ying³

(1. CREEC East China Survey and Design Co., Ltd., 310004, Hangzhou, China; 2. Hangzhou Metro Operation Co., Ltd., 310011, Hangzhou, China; 3. Hangzhou Metro Group Co., Ltd., 310003, Hangzhou, China)

Abstract [Objective] As a new generation of train control system, the TACS (train autonomous control system) based on vehicle-to-vehicle communication is significantly different from CBTC (communication-based train control) in system architecture. It is necessary to conduct a research on the degraded operation scheme of TACS in the event of equipment failure to ensure safe and reliable train operation. [Method] The characteristics of TACS based on vehicle-to-vehicle communication is elaborated and analyzed, and its architecture is introduced. The degraded operation requirements of TACS are analyzed, and a degraded operation scheme of TACS based on multi-sensor fusion technology of radar plus visual method is proposed. [Result & Conclusion] The above degraded operation scheme

can effectively solve problems such as train speed measuring, positioning, and interval protection, and effectively detect foreign object intrusion in the track area.

Key words urban rail transit; signal system; train control; vehicle-to-vehicle communication; degraded train operation; multi-sensor fusion technology

城市轨道交通信号系统从最初的固定闭塞、准移动闭塞,发展到目前普遍采用的 CBTC(基于通信的列车控制)移动闭塞,列车控制技术得到了质的提升。基于车车通信的 TACS(列车自主运行系统)作为新一代列车运行控制系统,具有安全、高效、灵活、经济、易部署、去中心化、系统结构简化、既有系统改造简单等优点,是未来列车控制技术发展的主要方向。

与 CBTC 相比, TACS 在架构上有较大调整:①将 OCC(运营控制中心)的 ATS(列车自动监控)发展为 ITS(智能列车监控);②整合了 CBTC 车站 ATP(列车自动防护)、CBI(计算机联锁)、DSU(数据存储单元)等设备,列车控制功能改由 OC(目标控制器)实现;③轨旁取消了 LEU(轨旁电子单元)、计轴/轨道电路、有源应答器、信号机等设备;④除传统 ATP/ATO(列车自动运行)功能外,由 IVOC(车载控制器)根据收到的信息自主计算列车移动授权。

由于 TACS 与 CBTC 在架构上存在显著差异,在设备故障情况下如何采取降级运行模式,保证列车运行安全、可靠,是 TACS 设计重点研究的内容之一。本文对 TACS 的特点进行分析,并对 TACS 的降级运行方案进行研究。

1 TACS 的特点

TACS 突破了 CBTC 以地面控制为主的列车控

制模式的局限性,基于车车通信架构,实现了以车载为核心的列车运行控制。

1.1 TACS 构成

参考目前主流信号系统供应商的设计方案,TACS 一般由 ITS、IOM(智能运维系统)、DCS(数据通信系统)、OC、IVOC 及轨旁设备等组成。图 1 为基于车车通信的 TACS 架构示意图,按照逻辑功能及设备设置位置,该架构分为 4 层:OCC 层、车站层、轨旁层及列车层。

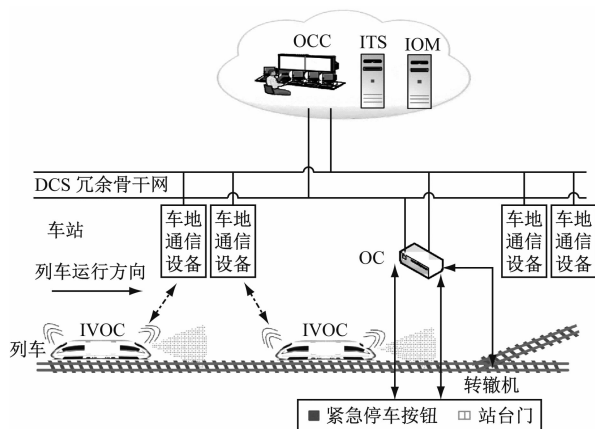


图 1 基于车车通信的 TACS 架构

Fig. 1 Architecture of TACS based on vehicle-to-vehicle communication

1) OCC 层:在 OCC 内配置了 1 套 ITS 及 1 套 IOM。ITS 负责向 IVOC 下发运营计划,同时接收各列车的状态信息。IOM 负责收集系统设备信息,进行数据分析,实现系统设备的预维护、状态修、故障快速定位及快速修复,并为设备维护提供建议。

2) 车站层:在车站设置 OC,不再设置 ZC(区域控制器)、CBI 及计轴设备。OC 负责接收 IVOC 和 ITS 的轨旁目标资源控制命令,实现轨旁控制目标状态的采集及控制。OC 通过 DCS 与车载设备、ITS 实时双向通信,向列车和 ITS 提供采集到的轨旁控制目标状态信息。OC 接收并执行列车、ITS 的控制指令,对管辖的轨旁目标进行控制权分配,并根据命令和权限的分配情况对转辙机、站台门等设备进行操控。

3) 轨旁层:设置道岔转辙机、无源应答器、车地无线通信设备等,不再设置有源应答器、计轴/轨道电路及信号机。

4) 列车层:每列车均配置 IVOC。IVOC 是车车通信的核心设备,通过雷达、速度传感器等设备实现列车测速,采用地面无源应答器、加速度计等

实现列车自主定位。IVOC 利用无线通信实时进行列车与列车(通过地面通信设备转发)、列车与地面之间的双向通信。通过与前车实时通信,IVOC 可获得前车位置、状态及驾驶模式等信息。通过车地通信,IVOC 接收轨旁转辙机、站台门、紧急停车按钮等设备的状态信息。与 CBTC 相比,TACS 下列车移动授权、列车运行速度、列车制动曲线等控制信息均由 IVOC 自主计算。此外,IVOC 输出牵引和制动信息,实现自主化移动闭塞运行控制,保证列车安全运行。

1.2 TACS 特征

TACS 突破了既有城市轨道交通列车控制系统依赖车站设备和轨旁设备实现列车运行控制的模式,通过 IVOC 实现列车控制。

1.2.1 进一步精简设备

TACS 以 IVOC 为核心,通过 OC 实现列车与轨旁设备的信息交互,精简了轨旁设备,缩短了数据的交互周期和复杂程度。列车不再通过 ZC 获取运行信息,IVOC 可自主规划列车运行路径并计算移动授权点。

1.2.2 提高线路运行效率

TACS 突破了传统轨旁 ATP 设备分区控制列车运行的方式,改为以列车自主控制为核心进行列车控制。列车和列车之间通过 DCS 网络直接通信,IVOC 通过车车通信获取前车实时状态信息(位置、速度、加速度等)。结合对前车行驶轨迹的预测,IVOC 计算前后列车不发生位移重合的安全防护速度,使列车制动率与减速度相匹配,从而实现基于相对速度制动追踪模型的安全防护。在保证列车前后方安全距离的基础上,2 个相邻的列车按允许的最大速度运行,这样可进一步缩短列车追踪间隔,提高线路的运行效率。

1.2.3 缩短信息流路径

图 2 为 CBTC 与 TACS 信息流路径对比示意图。精简后的 TACS 架构缩短了信息流路径,使得系统反应更灵敏。以列车紧急制动触发时间为例,CBTC 下列车紧急制动触发时间为 0.75 s,TACS 下列车紧急制动触发时间缩短至 0.50 s。

1.2.4 车站及轨旁设备减少,地面设备兼容性增强

TACS 采用以车载为核心的设计理念,车站及轨旁设备进一步减少,降低了 OCC 设备与轨旁设备的关联度,增强了不同制式轨旁设备的兼容性。因此,TACS 在既有线改造、信号系统互联互通等方面

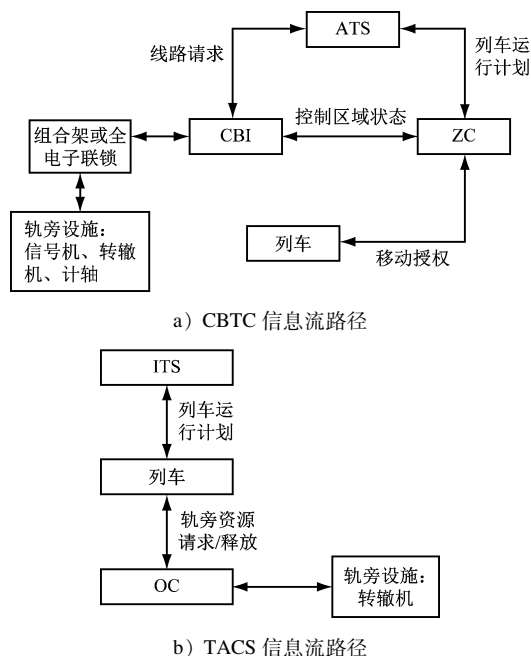


图2 CBTC与TACS信息流路径对比示意图

Fig. 2 Comparison diagram of the information flow path between CBTC and TACS

具有明显优势。TACS 不再依赖于地面设备,能够实现列车对向运行等灵活的运营调整方案,利于大小交路套跑、快慢车混行等运营方案的实施。

1.2.5 去 OCC 化的列车自主控制

与 CBTC 相比,TACS 支持列车自主化运行,列车的运行调度更加灵活,可对调度任务进行灵活分配,使行车调度指挥更加智能化。

2 TACS 降级运行需求分析

TACS 设备故障后需要调整为降级运行模式,以维持一定的运营水平。CBTC 一般依靠 CBI、计轴、有源应答器、车载等设备实现降级情况下的列车运行防护,而 TACS 因去除了 ZC、CBI、LEU、可变应答器、计轴及信号机等设备,仅通过 OC 实现列车与轨旁设备的信息交互,因此,TACS 不能沿用 CBTC 的降级运行方式,需要重新构建其降级系统。

列车速度和距离的精确测量是确保与速度相关的安全功能及列车精准定位的先决条件。基于 TACS 的架构,其降级系统需要采用新的列车速度及距离检测技术。结合目前的技术发展情况,可将雷达、视觉方式技术相融合,并结合目前普遍采用的速度传感设备(包含速度传感器及加速度计)及应答器设备,以满足 TACS 降级运行的需求。

3 TACS 降级运行采用的各类传感器

结合车载设备的构成特点,TACS 降级方案可采用“雷达+视觉方式”多传感器融合技术,即:在各类传感器感知、探测范围内,对轨行区的障碍物进行识别,完成列车到目标物体间的距离计算,判断碰撞风险并监控列车制动距离,计算相应的列车控制指令,向列车的牵引、制动子系统输出相应的控制指令。

3.1 各类传感器分析

多传感器融合需要对各类传感器进行分析。环境感知传感器主要有高速摄像机、激光雷达、毫米波雷达、超声波雷达等,这些传感器的优缺点如表 1 所示。

根据表 1,各类传感器单独使用时,均存在一定的局限性,因此,TACS 降级方案需要采用多传感器融合技术,以构成完整的列车测速、定位、测距系统。

3.2 摄像机定位技术

摄像机有单目摄像头和双目摄像头 2 种,采用双目摄像头可减少感知盲区。列车可设置长短焦双目高速摄像机,该摄像机可实现除测距外其他的列车定位功能。采用 3 个及以上轨旁特征标志(如轨旁设备、公里标等)实现定位,可提高列车定位的准确性。车载摄像头生成的图像坐标数据与车载地图坐标数据相匹配,进而确定列车位置。

3.3 雷达测距测速技术

激光雷达是通过探测远距离目标的散射光特性来获取目标相关信息的光学遥感技术。激光雷达分为一维探测、二维探测和三维探测 3 种类型,其中,三维激光雷达包含测距技术和测角技术。三维激光雷达可形成三维点云图像,实现距离测量、角度测量、障碍物检测、物体信息识别及运动轨迹追踪等功能。根据生成的点云,通过数据分析实现障碍物检测和距离测定。图 3 为隧道环境内三维激光雷达探测成像示意图。

毫米波雷达工作在毫米波段,利用无线电回波来探测目标物体的方向和距离。为提高雷达测距测速技术的可用性,TACS 应结合毫米波雷达、三维激光雷达的优缺点,在列车车头配备这 2 种雷达。此外,正常运营模式下 TACS 车载设备已设置了速度传感设备,降级模式下可将速度传感技术与雷达技术相结合,共同实现列车速度和距离的精确检测。

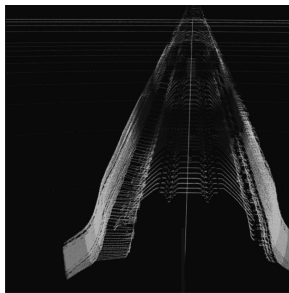
表 1 不同类型环境感知传感器的优缺点分析

Tab. 1 Analysis of the advantages and disadvantages for different types of environmental perception sensors

传感器名称	工作原理	优点	缺点
高速摄像机	高速摄像机为视觉传感器,摄像头将摄取目标转换成图像信号,传送给图像处理系统,相关信息转换为数字信号;图像处理系统对数字信号进行运算,抽取目标特征,进而根据判别的结果进行距离测量,估算前方物体与本车的距离	采集信息丰富,拍摄频率高;可多任务检测;可同时定位和建图	受光线及环境影响时识别率会降低;图像处理信息量大,系统响应时间相对较长
激光雷达	使用激光发射部件向一定视场角内发射光线,同时接收部件接收反射回来的光线;利用已知的和新获取的发射光线、反射光线数据,计算出反射点的相关信息,进而实现前方物体识别及前方物体与本车距离的估算	多线雷达的分辨率高,精度高;三维信息获取能力强;建模速度快	易受环境影响,雾、雨、雪等天气对测距功能有影响,沙尘暴对测距功能有严重影响
毫米波雷达	毫米波雷达工作在毫米波波段,利用无线电回波探测目标方向和距离	不受目标物体形状、颜色等因素干扰,环境适应性好;可测距测速,测速精度高	对目标物体的分辨率不高
超声波雷达	利用超声波在空气中传播的已知速度,测量声波在发射后遇到障碍物反射回来的时间,根据发射和接收的时间差计算得到发射点与障碍物的实际距离	指向性强,能量消耗缓慢;在介质中传播距离较远;稳定性好、穿透性强	抗干扰能力较弱;近距离探测时精度较高,远距离探测时精度较低



a) 隧道环境实景



b) 隧道环境三维成像

图 3 隧道环境内三维激光雷达探测成像示意图

Fig. 3 Schematic diagram of three-dimensional laser radar detection imaging in tunnel environment

由于目前多传感融合技术感知范围仍存在局限性,TACS 降级模式下应设定顶篷速度。例如,定义顶篷速度 $v = 60 \text{ km/h}$,列车 GEBR(可保证的紧急制动率) $a = 0.85 \text{ m/s}^2$,设平直线路上列车紧急制动距离为 s ,按 $2as = v^2$ 可估算得到 $s = 163 \text{ m}$ 。如需精确计算 s ,还需考虑线路坡度、系统延时、紧急制动响应时间及系统安全裕量等因素的影响。参考

某城市轨道交通线路的实施情况, s 约为 188 m 。因此,考虑一定的系统安全裕量,将列车前方可靠探测距离设为 200 m ,可以满足 TACS 降级运行的要求。

4 TACS 降级运行方案

4.1 降级运行方案架构

多传感器融合技术有利于形成安全、可靠的降级方案,图 4 为基于“雷达+视觉方式”多传感器融合技术的 TACS 降级运行方案架构。将多传感器融合设备、速度传感设备(已设在车载内)、应答器天线等设备接收到的信息相结合,可进一步提高列车测速及定位的精度。TACS 降级运行方案的系统架构分为 3 个层次:感知层、计算层、运用层。

4.1.1 感知层

通过雷达(含三维激光雷达、毫米波雷达)、高速摄像机感知列车前方环境,将接收到的相关信息上传至计算层。为提高列车测速及定位精度,列车既有速度传感设备、应答器天线采集到的信息同时分路传输至计算层。TACS 降级运行方案设计与激光雷达三维扫描、摄像机视频扫描融合,以提高列车前方环境感知的精确性、可靠性及稳定性。图 5 为雷达及高速摄像机探测示意图。

4.1.2 计算层

计算层根据感知层提交的信息,对各元素信息进行信号放大/滤波、数字转换、分析识别及特征提取,建立三维数据模型。三维数据模型与车载模型

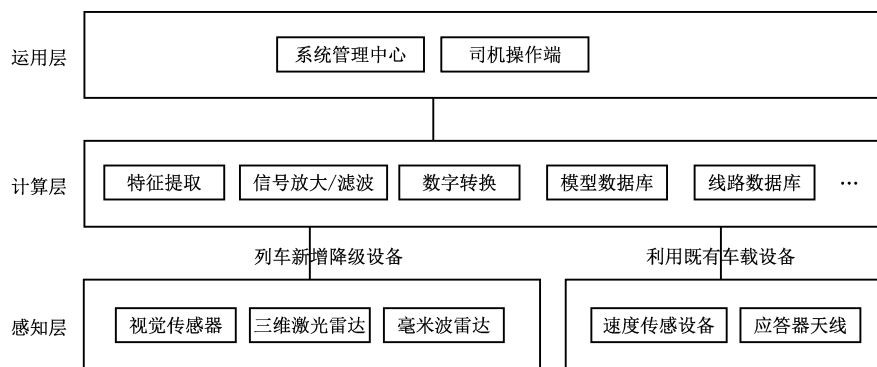


图 4 基于多传感器融合技术的 TACS 降级运行方案架构

Fig. 4 Architecture of TACS degraded operation scheme based on multi-sensor fusion technology

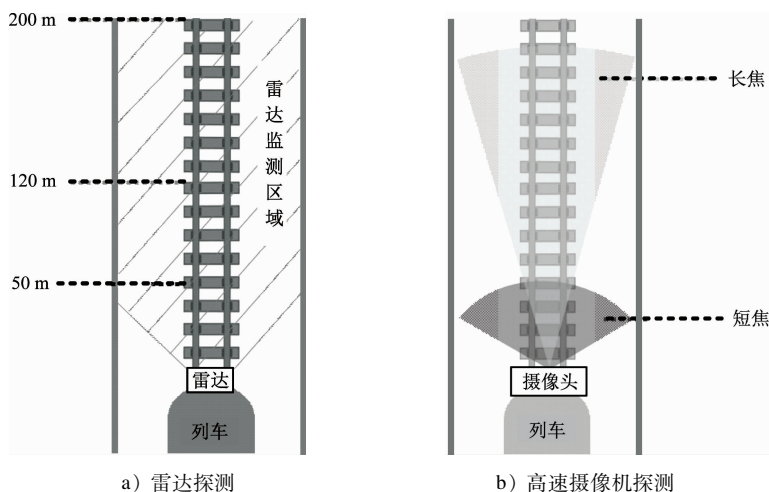


图 5 雷达及高速摄像机探测示意图

Fig. 5 Schematic diagram of radar and high-speed camera detection

数据库进行信息比对,计算出列车的位置、速度、与前方目标物体的距离等参数。计算结果与已存储的线路数据库进行数据映射,进而实现列车控制。

4.1.3 运用层

降级模式下,利用列车驾驶室的 HMI,采用切换机制切换到 TACS 降级运行方案,将与车辆的接口信息均切换至 TACS 降级运行状态。司机根据 TACS 降级运行方案提供的列车速度、位置、与前方列车距离、推荐速度等信息控制列车运行。

4.2 小曲线半径弯道区段的目标探测技术

在曲线半径较小的弯道,由于雷达与摄像机对前方环境的感知受阻,在感知距离不能满足列车安全控制距离要求时,可在轨旁设置多组“雷达+摄像机”,进行地面补充感知。感知到的信息通过车站设置的降级设备进行计算处理,计算结果通过车地无线设备上传至列车 IVOC。

图 6 为小曲线半径弯道区段布设感知设备示意图。

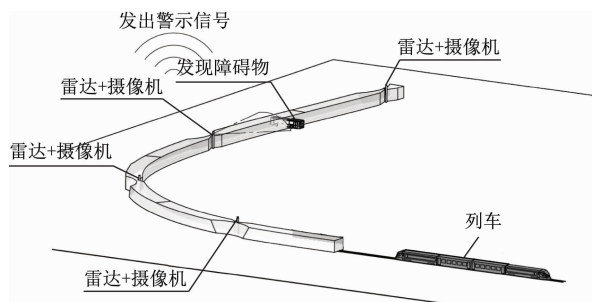


图 6 小曲线半径弯道区段感知设备布置图

Fig. 6 Layout of perception devices layout in small radius curve sections

4.3 轨道资源控制

TACS 对轨道资源的控制采用列车申请的方式,降级模式下不能按照传统的进路方式指挥行车。本研究突破了传统点式 ATP 的降级运行理念,重新构建了一套新的 TACS 降级运行方案。该 TACS 降级运行方案在限定的列车运行速度下,参照正常自主运行信号系统的工作原理进行轨旁资

源申请。当需要征用前方轨道资源(如操控道岔)时,列车需要与车站降级系统设备进行双向通信,控制前方转辙机动作到规定位置,转辙机位置信息同样需要经车站降级系统设备通过车地无线传至列车。

此外,在线路小曲线半径弯道区段内设置的地面补充感知设备信息、紧急停车按钮信息等信息,同样需要经过车地无线传输至列车。由此可见,TACS 降级运行方案作为一套完整的备用系统,需要车地无线通信传输相关信息,其降级系统的车地无线可通过 LTE-M(地铁长期演进)综合承载网、PIS(乘客信息系统)无线网或 5G 网等进行传输。

4.4 异物探测及侵限监测

基于“雷达+视觉方式”多传感器融合技术的 TACS 降级运行方案不仅可以在设备故障情况下保持一定的运营能力,还具有轨道区域异物探测及侵限监测的功能。在 TACS 降级运行方案计算层设置正常线路模型数据库,将雷达、摄像机采集的实时信息与模型数据库信息进行比对,可实现轨道区域的异物探测及设备侵限监测。图 7 为轨道区域异物入侵探测流程。

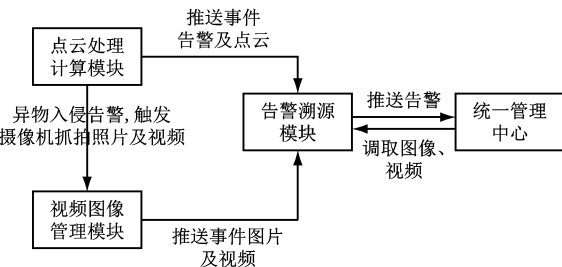


图 7 轨道区域异物入侵探测流程

Fig. 7 Detection process of foreign object intrusion in the track area

5 结语

1) 基于车车通信的 TACS 具有系统架构优化、运营能力提升、设备精简、既有线改造便利等优势,在城市轨道交通领域内的应用前景广阔。

2) 与 CBTC 相比,TACS 的系统架构差异较大,需要构建与 TACS 架构相匹配的降级运行方案。本文提出基于“雷达+视觉方式”多传感器融合技

术的 TACS 降级运行方案,能有效实现列车测速、定位、间隔防护、轨道区域异物入侵监测等功能。

3) 本文所提降级运行方案目前尚处于探索阶段,后续在保证传感器实时可靠工作及计算层算法实现多传感器信息融合安全性等方面,需要结合 TACS 列车控制技术的发展做更为深入的研究。

参考文献

- [1] 上海轨道交通无人驾驶列控系统工程技术研究中心. 列车自主运行系统(TACS)技术规范[R]. 上海:上海轨道交通无人驾驶列控系统工程技术研究中心,2021.
Shanghai Engineering Research Center of Driverless Train Control of Urban Guided Transport. Technical specification of train autonomous control system[R]. Shanghai: Shanghai Engineering Research Center of Driverless Train Control of Urban Guided Transport, 2021.
- [2] 汪小勇. 城市轨道交通基于车车通信的列车自主运行系统探讨[J]. 中国铁路, 2020(9): 77.
WANG Xiaoyong. Discussion on train autonomous circumambulate system based on vehicle-to-vehicle communication in urban rail transit[J]. China Railway, 2020(9): 77.
- [3] 徐文轩, 李伟. 无人驾驶汽车环境感知与定位技术[J]. 汽车科技, 2021(6): 53.
XU Wenxuan, LI Wei. Environment perception and location technology of driverless vehicles[J]. Auto Sci-Tech, 2021(6): 53.
- [4] 郑艺, 胡云卿, 耿宏亮, 等. 车车通信 CBTC 区间追踪间隔研究[J]. 控制与信息技术, 2020(3): 81.
ZHENG Yi, HU Yunqing, GENG Hongliang, et al. Research on interstation tracking interval of CBTC system based on train-train communication[J]. Control and Information Technology, 2020(3): 81.
- [5] 苗德元, 陈吉祥, 周兴动, 等. 行星轮滚针轴承自动化装配单元的设计[J]. 机械工程与自动化, 2022(2): 118.
MIAO Deyuan, CHEN Jixiang, ZHOU Xingdong, et al. Design of automatic assembly unit for needle roller bearings of planetary gears[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2022(2): 118.

· 收稿日期:2022-08-29 修回日期:2022-10-10 出版日期:2024-09-10

Received:2022-08-29 Revised:2022-10-10 Published:2024-09-10

· 通信作者:杜时勇,高级工程师,63221514@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license